

补充材料

《基于线性光学元件的偏振-时间超纠缠 W 态浓缩*》

郭鹏亮¹⁾²⁾⁴⁾ 席舜¹⁾³⁾ 高成艳¹⁾²⁾⁴⁾

1) (太原师范学院物理系, 晋中 030619)

2) (太原师范学院计算与应用物理研究所, 晋中 030619)

3) (太原师范学院计算机科学与技术学院, 晋中 030619)

4) (太原师范学院, 智能优化计算与区块链技术山西省重点实验室, 晋中 030619)

对于参数更一般的情况, N 个接收方首先判断进行①装置中超纠缠态偏振浓缩操作的接收方, 选出参数 $a_1, a_2, \dots, a_N$ 中的最小值对应的接收方, 将最小参数值记为 $a_{\min}$, 则与之对应的接收方不进行偏振浓缩操作, 其他的接收方对手中的超纠缠光子进行①装置中超纠缠态偏振浓缩操作, 其中①装置中波片 $R_{\theta_{j1}}$ 满足

$$|V\rangle \rightarrow \cos \theta_{j1} |V\rangle + \sin \theta_{j1} |H\rangle, \quad \theta_{j1} = \arccos(a_{\min}/a_i),$$

式中 a_i 为与之对应进行偏振浓缩接收者的非最小值的系数, 这里 j 可以取 A, B, C, $\dots$, 或 Z, i 对应取 1, 2, 3, $\dots$, 或 N 。对超纠缠态中偏振纠缠浓缩操作完成后, N 个接收方需要判断进行②装置中超纠缠态时间纠缠的浓缩操作的接收者, 选出系数 $b_1, b_2, \dots, b_N$ 中的最小值对应的接收方, 将最小参数值记为 $b_{\min}$, 则持有最小参数超纠缠光子的接收方不进行时间浓缩操作, 其他的接收方进行时间浓缩操作, 其中②装置中波片 $R_{\theta_{j2}}$ 满足

$$|H\rangle \rightarrow \cos \theta_{j2} |H\rangle + \sin \theta_{j2} |V\rangle, \quad \theta_{j2} = \arccos(b_{\min}/b_i)。$$

波片 $R_{\theta_{j3}}$ 满足

$$|V\rangle \rightarrow \cos \theta_{j3} |V\rangle + \sin \theta_{j3} |H\rangle, \quad \theta_{j3} = \arccos(b_{\min}/b_i),$$

式中, b_i 为与之对应进行超纠缠态时间浓缩接收者的非最小值的系数, 同样这里 j 可以取 A, B, C, $\dots$, 或 Z 时, i 对应取 1, 2, 3, $\dots$, 或 N 。由于超纠缠浓缩过程是通过参数分裂法获得最大超纠缠态, 超纠缠浓缩过程完成后总要恢复到超纠缠 W 态的形式, 因此无论参数如何置换, 只要获取参数中的最小值和相应的接收方, 那么参数为非最小值接收方就可以获得他们各自波片需要调整的角度, 进而可以完成超纠缠浓缩过程, 与参数排列顺序无关。

补充(4)式—(6)式推导过程: 超纠缠光子偏振纠缠浓缩完成后, 持有非最小系数的 Alice 和 Bob 接收方分别将各自持有的光子通过超纠缠时间纠缠浓缩装置中。首先, A 光子和 B

光子经过 PBS₄ 后, 被反射的光子和透射的光子经过 PC_L 变为 $|\phi_3\rangle_{ABC}$, 其中反射的 A(B)光子和透射的 A(B)光子经过 PC_L 后分别再经过 PBS₅ 和 PBS₈, 被 PBS₅ 透射的光子经过波片 $R_{\theta A2}(R_{\theta B2})$, 这里 $R_{\theta A2}(R_{\theta B2})$ 的作用:

$$|H\rangle \rightarrow b_3/b_1 |H\rangle + \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2}/b_1 |V\rangle \quad (|H\rangle \rightarrow b_3/b_2 |H\rangle + \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2}/b_2 |V\rangle),$$

被 PBS₈ 反射的光子经过波片 $R_{\theta A3}(R_{\theta B3})$, 这里 $R_{\theta A3}(R_{\theta B3})$ 的作用:

$$|V\rangle \rightarrow b_3/b_1 |V\rangle + \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2}/b_1 |H\rangle \quad (|V\rangle \rightarrow b_3/b_2 |V\rangle + \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2}/b_2 |H\rangle).$$

此时系统状态转化为

$$\begin{aligned} |\phi_3\rangle_{ABC} \xrightarrow{R_{\theta A2}, R_{\theta B2}, R_{\theta A3}, R_{\theta B3}} & a_3(b_3 |H_L H_S H_S\rangle_{ABC} + b_3 |V_S V_L H_S\rangle_{ABC} + b_3 |V_S H_S H_L\rangle_{ABC} \\ & + b_3 |V_L V_S H_S\rangle_{ABC} + b_3 |H_S H_L H_S\rangle_{ABC} + b_3 |H_S V_S H_L\rangle_{ABC} \\ & + b_3 |V_L H_S V_S\rangle_{ABC} + b_3 |H_S V_L V_S\rangle_{ABC} + b_3 |H_S H_S V_L\rangle_{ABC}) \\ & + \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2} |V_L H_S H_S\rangle_{ABC} + \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2} |H_L V_S H_S\rangle_{ABC} \\ & + \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2} |H_L H_S V_S\rangle_{ABC} + \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2} |V_S H_L H_S\rangle_{ABC} \\ & + \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2} |H_S V_L H_S\rangle_{ABC} + \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2} |H_S H_L V_S\rangle_{ABC}). \end{aligned} \quad (S1)$$

之后经过 $R_{\theta A2}(R_{\theta B2})$ 的 A(B)光子经过 PBS₆ 后, 反射的光子由探测器 $D_{A2}(D_{B2})$ 探测, 透射的光子经过 D_L 后与经过 PBS₅ 反射的光子在 PBS₇ 汇合, 经过 $R_{\theta A3}(R_{\theta B3})$ 的 A(B)光子经过 PBS₉ 后, 透射的光子由探测器 $D_{A3}(D_{B3})$ 探测, 反射的光子经过与经过 PBS₈ 透射的光子在 PBS₁₀ 汇合, 系统状态变为 $|\phi_4\rangle_{ABC}$ 。最终从 PBS₇ 和 PBS₁₀ 输出的 A(B)光子分别经过 PC_L, 这里 PC_L 同样是对长路径上的光子进行反转操作, 系统演化为

$$\begin{aligned} |\phi_4\rangle_{ABC} \xrightarrow{PC_L} & a_3(b_3 |V_L H_S H_S\rangle_{ABC} + b_3 |V_S H_L H_S\rangle_{ABC} + b_3 |V_S H_S H_L\rangle_{ABC} + \\ & b_3 |H_L V_S H_S\rangle_{ABC} + b_3 |H_S V_L H_S\rangle_{ABC} + b_3 |H_S V_S H_L\rangle_{ABC} + b_3 |H_L H_S V_S\rangle_{ABC} + \\ & b_3 |H_S H_L V_S\rangle_{ABC} + b_3 |H_S H_S V_L\rangle_{ABC}) + \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2} |V_L H_S H_S\rangle_{D_{A2}BC} + \\ & \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2} |H_L V_S H_S\rangle_{D_{A3}BC} + \sqrt{|b_1|^2 - |b_3|^2} |H_L H_S V_S\rangle_{D_{A3}BC} + \\ & \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2} |V_S H_L H_S\rangle_{AD_{B3}C} + \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2} |H_S V_L H_S\rangle_{AD_{B2}C} + \\ & \sqrt{|b_2|^2 - |b_3|^2} |H_S H_L V_S\rangle_{AD_{B3}C}). \end{aligned} \quad (S2)$$

最终所有光子在 PBS₁₁ 上汇合, 系统状态变为 $|\phi_5\rangle_{ABC}$ 。